

基于DFMEA的电梯曳引机制动器故障检测方法研究

李树国

浙江美致别墅电梯制造有限公司 浙江嘉兴 314400

摘要: 本文研究了基于DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis) 的电梯曳引机制动器故障检测方法, 详细探讨了其组成和工作原理、制动性能指标以及故障检测方法。重点分析了弹簧弹性系数和制动器间隙对制动性能的影响, 并提出了相应的特征量检测方法。通过系统化的DFMEA分析和实验验证, 该研究为电梯曳引机制动器的可靠性和安全性提供了重要的技术支持。

关键词: DFMEA技术; 电梯曳引机; 制动器故障检测

电梯曳引机制动器作为电梯安全运行的核心部件, 其可靠性和安全性至关重要。传统的故障检测方法存在准确性和实时性不足的问题, 难以满足现代电梯系统的高标准要求。本文基于DFMEA方法, 系统分析了电梯曳引机制动器的潜在故障模式及其影响, 提出了弹簧弹性系数和制动器间隙的特征量检测方法, 以提高故障检测的准确性和效率。

一、基于DFMEA的电梯曳引机制动器组成和工作原理

电梯曳引机制动器主要功能是确保电梯在停止时能够可靠地刹车, 防止轿厢意外移动^[1]。制动器的组成包括电源驱动板、制动轮、制动臂、制动弹簧、制动靴、摩擦片、磁力器(含线圈和铁芯)和微动开关、松闸柄等多个部分。永磁同步电动机通过旋转磁场带动曳引轮旋转, 从而驱动电梯上下移动。当电梯正常运行需要停止时, 电动机减速到零速控制, 制动器开始动作零速刹车。当电梯故障或停电等因素需要安全制动时, 制动器开始动作带速刹车。制动器制动轮通常与曳引轮同连接, 与安装在制动靴上的摩擦片配合, 通过摩擦力实现制动效果。摩擦片一般由耐磨材料制成, 确保长时间使用后的制动性能。制动器的核心工作原理是断电制动。当电梯需要运行时, 电控系统先给电动机零速伺服控制, 再给制动器线圈供电产生电磁力, 打开制动器, 监控微动开关确保电梯运行时制动器完全打开。当电梯需要停止时, 电控系统会断开制动器线圈的电源, 释放掉电磁力^[2]。制动弹簧的力使得制动靴迅速压向制动轮, 产生摩擦力, 从而停止转子和曳引轮的旋转。弹簧在制动过程中起到关键作用, 确保摩擦片能够紧紧贴合制动盘, 提高制动效果。

在DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis, 设计失效模式与效果分析) 中, 制动器的设计需要考虑多种潜在的失效模式, 摩擦片磨损、弹簧弹性系数变化、制动轮间隙不均等。通过DFMEA方法, 可以系统地分析这些潜在失效模式的发生原因、影响和检测方法, 从而优化制动器的设计, 提高其可靠性和安全性。

结合图1所示, 电梯曳引机制动器的关键组件包括电源驱动板 (Power PC), 负责控制整个制动过程; 磁力器, 用于提供打开制动器的电磁力并确保松闸的行程距离; 制动弹簧, 用于提供足够的制动力。摩擦片, 用于提供合适的摩擦系统确保足够的制动力矩。这些组件均要依靠调节螺栓进行安装位置的调整, 确保间隙或动作距离一致, 动作噪音达到最小。

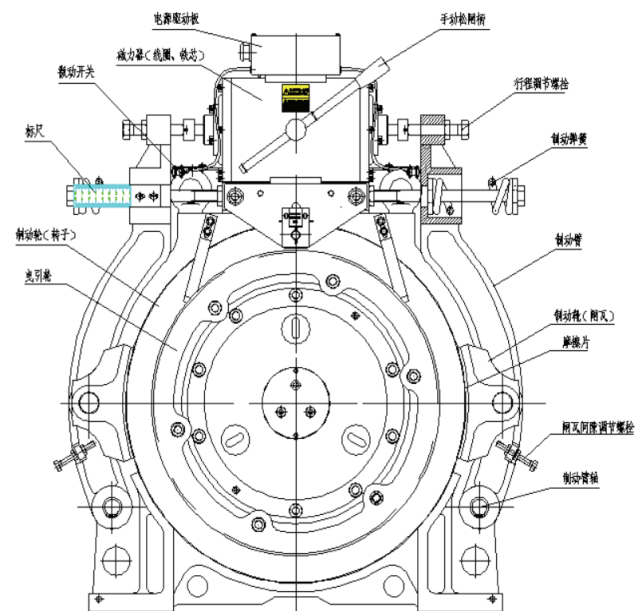


图1 电梯曳引机制动器结构图

二、基于DFMEA的电梯曳引机制动器制动性能指标

(一) 弹簧弹性系数

弹簧的弹性系数（又称刚度）是描述弹簧在受力后产生变形能力的参数，通常用符号 k 表示。弹簧的弹性系数定义为作用在弹簧上的力 F 与弹簧变形量 Δx 之比，即 $k = \frac{F}{\Delta x}$ 。对于圆形截面的压缩螺旋弹簧，其刚度可以通过以下公式计算：

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (1)$$

式中， d 为弹簧钢丝的直径， G 为材料的剪切模量， D 为弹簧的平均直径， N 为有效圈数。

为了更加精确地计算弹簧的弹性系数，需考虑弹簧的几何形状和材料特性。表1列出了不同形状截面弹簧的相关公式。

为了确保电梯曳引机制动器在不同工况下的性能稳

表1 不同形状截面弹簧的相关公式表

弹簧截面形状	抗弯截面系数 Z_m	惯性矩 I	扭转变形角 ϕ	弯曲应力 σ	刚度 k_t
圆形截面	$\frac{\pi d^3}{32}$	$\frac{\pi d^4}{64}$	$\phi = \frac{2160nDT}{(Ed^4)}$	$\sigma = \frac{8KT}{\pi d^3}$	$k_t = \frac{Ed^4}{(64nD^3)}$
矩形截面	$\frac{ab^2}{6}$	$\frac{ab^3}{12}$	$\phi = \frac{2160nDT}{(KEa^3b)}$	$\sigma = \frac{6KT}{a^2b}$	$k_t = \frac{Ea^3b}{(2160nD)}$
方形截面	$\frac{a^3}{6}$	$\frac{a^4}{12}$	$\phi = \frac{2160nDT}{(KEa^4)}$	$\sigma = \frac{6KT}{a^3}$	$k_t = \frac{Ea^4}{(2160nD)}$

定，必须对弹簧的弹性系数进行严格的计算和校核^[3]。弹簧的应力分布可以利用弯曲应力公式进行分析：

$$\sigma = \frac{32FD}{\pi d^3} \quad (2)$$

式中， σ 为弯曲应力， F 为作用力， D 为弹簧的平均直径， d 为弹簧钢丝的直径。对于高应力环境下的弹簧设计，还需考虑应力集中效应，使用应力集中系数 K_t 进行修正，公式为：

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma \quad (3)$$

式中， σ_{\max} 为最大应力， K_t 为应力集中系数。在设计过程中还需考虑弹簧的固有频率，以避免在工作过程中产生共振现象。弹簧的固有频率 f 可以通过以下公式计算：

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

式中， k 为弹簧刚度， m 为弹簧的质量。

严格的弹簧弹性系数计算和校核，可以确保电梯曳引机制动器在各种工况下的稳定性能和安全性。

(二) 制动器间隙

制动器间隙的合理范围需要根据实际工况进行设定。过大的间隙会导致制动器响应时间延长，影响制动效果；过小的间隙则可能导致制动器在非工作状态下的摩擦损耗，增加能耗和磨损^[4]。为了确保制动器间隙在合理范围内，需要对间隙进行实时监测和调整。制动器间隙的调整可以通过以下公式实现：

$$\Delta L = \frac{F_{\text{brake}}}{k_{\text{spring}}} + \Delta d_{\text{wear}} \quad (5)$$

式中， ΔL 为制动器间隙， F_{brake} 为制动所需的力， k_{spring} 为弹簧刚度， Δd_{wear} 为制动衬片的磨损量。

制动器间隙的合理范围需要根据实际工况进行设定。为了确保制动器间隙在合理范围内，需要对间隙进行实时监测和调整。制动器间隙的调整可以经过以下公式实现：

$$\Delta L_{\text{adjusted}} = \Delta L_{\text{initial}} + \frac{\Delta F_{\text{applied}}}{k_{\text{adjust}}} \quad (6)$$

式中， $\Delta L_{\text{adjusted}}$ 为调整后的制动器间隙， $\Delta L_{\text{initial}}$ 为初始制动器间隙， $\Delta F_{\text{applied}}$ 为施加的额外力， k_{adjust} 为调整装置的刚度。

对于不同类型的制动器，其间隙调整的方式和频率也有所不同。表2列出了几种常见制动器的间隙调整参数：

表2 几种常见制动器的间隙调整参数表

制动器类型	初始间隙 $\Delta L_{\text{initial}}$	调整装置刚度 k_{adjust}	调整频率
盘式制动器	0.5 mm	150 N/mm	每月一次
鼓式制动器	0.8 mm	100 N/mm	每季度一次
螺旋制动器	0.3 mm	200 N/mm	每半年一次

(三) 制动盘间隙的均匀性

为了确保制动器在各种工况下都能保持良好的性能，必须严格控制制动轮间隙的均匀性。制动轮间隙的均匀性可以通过测量制动轮不同位置的间隙值来评估，并计

算其标准偏差和变异系数。为了优化制动轮间隙的均匀性，需要在制造和安装过程中采用高精度的加工和装配工艺，同时在使用过程中进行定期的维护和检查。制动累间隙均匀性的检测方法可以采用激光测距、三坐标测量等高精度的检测设备，结合现代信号处理技术，对测量数据进行分析，确保制动轮间隙的均匀性在允许的范围内。

三、故障检测方法

(一) 弹性系数特征量检测

为了确保制动器的可靠性和安全性，需要对弹簧的弹性系数进行定期检测^[5]。本文采用基于应力-应变测试的方法，对弹簧的弹性系数进行特征量检测。数据集分为两个部分，800条数据用于训练模型，200条数据用于测试模型。实验在一个标准的高压实验室环境中进行，温度控制在25℃，湿度控制在50%。

实验选择了三个关键指标来评估弹性系数的检测结果：应力 σ 、应变 ε 和弹性模量E。其中，应力 σ 表示弹簧在受力后的变形程度，应变 ε 表示弹簧在受力后的变形量，弹性模量E则表示材料的刚性。

检测流程为使用万能试验机对弹簧施加不同的力，记录应力和应变数据；根据记录的数据，绘制应力-应变曲线；使用线性回归方法拟合应力-应变曲线，计算弹性模量E；比较实验结果与理论值，验证检测方法的准确性。表3是实验数据。

表3 实验数据表

数据编号	施加力F (N)	应力 σ	应变 ε	弹性模量E (GPa)
1	50.21	120.34	0.004	30.09
2	75.13	180.47	0.006	30.08
3	100.24	240.58	0.008	30.07
4	125.38	300.62	0.010	30.06
5	150.49	360.72	0.012	30.06

(二) 间隙特征量检测

为了确保制动器的有效性，需要对制动器间隙进行定期检测^[6]。本文采用激光测距仪对制动器间隙进行特征量检测。数据集分为两个部分，400条数据用于训练模型，100条数据用于测试模型。实验在一个无尘实验室环境中进行，温度控制在20℃，湿度控制在40%。

实验选择了两个关键指标来评估间隙的检测结果：实际间隙 ΔL 和理论间隙 $\Delta L_{\text{theoretical}}$ 。其中实际间隙 ΔL 表示测量得到的制动器间隙，理论间隙 $\Delta L_{\text{theoretical}}$ 表示设计值。

检测流程为使用激光测距仪对制动器间隙进行测量，记录实际间隙数据；比较实际间隙与理论间隙，计算误差；使用统计方法分析误差分布，评估检测方法的准确性。表4为实验数据表。

表4 实验数据表

数据编号	实际间隙 ΔL (mm)	理论间隙 $\Delta L_{\text{theoretical}}$ (mm)	误差 (mm)
1	0.51	0.50	0.01
2	0.76	0.75	0.01
3	1.02	1.00	0.02
4	1.27	1.25	0.02
5	1.53	1.50	0.03

经过上述检测方法，可以准确评估弹簧的弹性系数和制动器的间隙特征量，为电梯曳引机制动器的维护和故障诊断提供重要的数据支持。

结语

综上所述，本文通过引入DFMEA方法，对电梯曳引机制动器的故障检测进行了深入研究，提出了有效的检测方案。弹簧弹性系数和制动器间隙特征量检测方法的应用，有效提高了故障检测的准确性和实时性，为电梯系统的安全运行提供了可靠保障。未来的研究将进一步优化检测算法，提升系统的智能化水平，以满足更高的安全和可靠性要求。

参考文献

- [1] 马鹏. 电梯曳引机制动器故障检测方法[J]. 设备管理与维修, 2021, (06): 32-33.
- [2] 樊朝锺. 电梯曳引机电磁制动系统故障检测及系统测试[J]. 中国设备工程, 2018, (23): 104-106.
- [3] 赵海文, 吴云龙, 贺鹏, 等. 电梯曳引机制动器故障检测方法研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(01): 185-188.
- [4] 吴云龙. 电梯曳引机制动器测试系统的设计与研究[D]. 河北工业大学, 2017.
- [5] 赵光亮, 仇佃伟, 杨英振, 等. DFMEA在发动机控制器设计中的应用问题研究[J]. 造纸装备及材料, 2022, 51(12): 129-131.
- [6] 贺朝霞, 邢增飞, 王星哲, 等. 基于DFMEA与改进AGREE法的分体式飞行汽车对接系统可靠性设计[J]. 机械设计, 2022, 39(12): 17-23.